

Développements récents en matière de conception, de maintenance et d'utilisation des ontologies

Le présent article offre une synthèse des développements récents survenus dans le domaine de l'ingénierie ontologique: les bases théoriques, les ontologies les plus connues, les méthodologies et les environnements logiciels disponibles pour la création d'ontologies, ainsi que l'utilisation d'ontologies dans des applications à des fins commerciales et de recherche.

Terme-clé :
ontologies

1 Introduction

En 1991, le *Knowledge Sharing Effort* de l'Arpa (Agence pour les projets de recherche avancés) (Neches *et al.* 1991) remet entièrement en question la méthode de conception de systèmes intelligents lorsqu'il déclare que « dans l'état actuel des choses, la construction de systèmes intelligents implique habituellement la mise au point, à partir de zéro, de bases de connaissances, alors que cela pourrait être réalisé en assemblant des composants réutilisables. Les constructeurs de systèmes devraient alors uniquement se consacrer à la conception de nouvelles connaissances et de systèmes de raisonnement spécifiques adaptés à la tâche de leur système en vue de leur faire exécuter une partie du raisonnement. Ainsi, la connaissance déclarative, les techniques de résolution de problèmes et les services de raisonnement constitueraient un fonds commun exploitable par tous les systèmes. En procédant de cette manière, il serait possible de mettre au point des systèmes plus performants et moins onéreux... »

Depuis lors, les bases conceptuelles de la construction de technologies qui permettent tant la réutilisation que la mise en commun

de composants de connaissances ont fortement évolué. Des méthodes de résolution de problèmes (*Problem Solving Methods – PSM*) et des ontologies ont été mises au point dans le but de partager et de réutiliser les connaissances ainsi que les raisonnements de différents secteurs d'activité et de production. Les ontologies renvoient aux connaissances statiques d'un domaine alors que les méthodes de résolution de problème reflètent des connaissances dynamiques de raisonnement. L'intégration d'ontologies et de PSM constitue une solution envisageable au problème d'interaction (Bylander *et al.* 1998), à savoir que la représentation de connaissances à des fins de résolution de problèmes est fortement influencée par la nature du problème, d'une part, et par la stratégie de déduction à appliquer au problème, d'autre part. Les ontologies et les PSM offrent l'avantage de pouvoir expliciter cette interaction et de la prendre en compte.

Le présent document a pour objectif de répondre aux questions suivantes: qu'est-ce qu'une ontologie? Quels sont les principes à suivre pour construire une ontologie? Quels sont les composants d'une ontologie? Quels types d'ontologies existent déjà? Comment les ontologies sont-elles organisées en bibliothèques? Quelles méthodes dois-je suivre afin

de mettre au point ma propre ontologie? Quelles sont les techniques adéquates pour chaque étape? Comment les outils logiciels soutiennent-ils les processus de construction et d'utilisation des ontologies? Quelles sont les ontologies les plus connues? Quelles sont les utilisations des ontologies? Quels critères dois-je prendre en compte pour choisir l'ontologie appropriée à mon application? etc.

En vue de répondre à ces questions, l'article est constitué comme suit: présentation des bases théoriques de l'ingénierie ontologique, et ensuite, des ontologies les plus connues, des méthodologies, des outils et des langages de conception d'ontologies, et finalement quelques utilisations d'ontologies dans des applications.

2 Bases théoriques

2.1 Qu'est-ce qu'une ontologie?

Ce terme est issu du domaine de la philosophie, où il signifie «explication systématique de l'existence». Dans le cadre de l'intelligence artificielle, Neches et ses collègues (Neches *et al.* 1991) furent les premiers à en proposer une définition, à savoir: «une ontologie définit les termes et les relations de base du vocabulaire d'un domaine ainsi que les règles qui indiquent comment combiner les termes et les relations de façon à pouvoir étendre le vocabulaire». Cette définition nous dit comment élaborer une ontologie, en nous offrant des directives relativement floues: repérer les termes de base et les relations entre les termes, identifier les règles servant à les combiner, fournir des définitions de ces termes et de ces relations. Notons que d'après cette définition, une ontologie inclut non seulement les termes qui y sont explicitement

définis, mais aussi les termes qui peuvent être créés par déduction en utilisant les règles. En 1993, Gruber (Gruber 1993) formule la définition suivante, à savoir «une ontologie est une spécification explicite d'une conceptualisation», qui deviendra célèbre et restera la définition la plus citée dans la littérature scientifique. En 1997, Borst (Borst 1997) apporte une légère modification à la définition de Gruber en précisant que «les ontologies se définissent comme une spécification formelle d'une conceptualisation commune». Studer et ses collègues (Studer *et al.* 1998) ont donné l'interprétation suivante de ces deux définitions: «la conceptualisation renvoie à un modèle abstrait d'un quelconque phénomène après en avoir relevé les concepts significatifs». Par *explicite*, il faut entendre que le type de concepts utilisés, ainsi que leurs contraintes d'utilisation, sont définies de façon explicite; quant à l'adjectif *formel*, il exprime le fait que l'ontologie doit être lisible par ordinateur. *Commun* renvoie à l'idée qu'une ontologie rend compte d'un savoir consensuel, c'est-à-dire qu'elle n'est pas l'objet d'un individu, mais qu'elle est reconnue par un groupe».

De nombreuses définitions ont été appliquées à l'ontologie après celle de Gruber. En 1995, Guarino et Giarretta (Guarino *et al.* 1995) ont recueilli sept définitions dans la littérature scientifique et en ont fourni des interprétations sémantiques. D'autres auteurs, cependant, offrent des définitions fondées sur l'approche qu'ils ont adoptée pour construire leurs ontologies. Selon Swartout et ses collègues (Swartout *et al.* 1997), «une ontologie est un ensemble de termes structurés de façon hiérarchique, conçu afin de décrire un domaine et qui peut servir de charpente à une base de connaissances». Cette définition se base sur le fait qu'ils construisent des

ontologies de connaissances spécifiques à des domaines d'expertise en identifiant les termes significatifs d'un certain domaine de l'ontologie *Sensus* (qui inclut plus de 50 000 termes). Ils affinent ensuite cette dernière à l'aide d'une sorte d'heuristique. Bernaras et ses condisciples (Bernaras *et al.* 1996) construisent une ontologie différemment en partant d'une base de connaissances, qui sera raffinée et enrichie de nouvelles définitions dans le cas où de nouvelles applications sont créées. Nous proposerons en conséquence la définition suivante: «une ontologie fournit les moyens de décrire de façon explicite la conceptualisation des connaissances représentées dans une base de connaissances».

Pour conclure cette section, nous pouvons donc affirmer que les définitions du terme ontologie abondent dans la littérature scientifique. Les définitions, dans leur diversité, offrent des points de vue à la fois différents et complémentaires sur un même concept.

2.2 Principes à suivre dans le cadre de l'élaboration d'une ontologie

Nous résumons ici certains critères conceptuels et un ensemble de principes qui se sont avérés efficaces dans le domaine de la conception d'ontologies.

- Clarté et objectivité (Gruber 1993): l'ontologie devrait fournir le sens des termes définis en offrant des définitions objectives ainsi que de la documentation en langage naturel.
- Exhaustivité (Gruber 1993): une définition exprimée par une condition nécessaire et suffisante est préférable à une définition exprimée seulement par une condition nécessaire ou par une condition suffisante.

- Cohérence (Gruber 1993): afin de pouvoir formuler des inférences cohérentes avec les définitions.
- Extensibilité monotone maximale (Gruber 1993): les nouveaux termes, qu'ils relèvent de la langue générale ou d'une langue de spécialité, devraient être inclus dans l'ontologie sans entraîner de modifications dans les définitions existantes.
- Interventions ontologiques minimales (Gruber 1993): intervenir le moins possible sur le monde en phase de modélisation. L'ontologie devrait spécifier le moins possible le sens de ses termes, de façon à ce que les parties impliquées dans l'ontologie aient les mains libres pour spécialiser et instancier l'ontologie à leur guise.
- Principe de distinction ontologique (Borgo *et al.* 1996): les classes d'une ontologie doivent être séparées. Le critère d'identité sera utilisé afin d'isoler le noyau des propriétés jugées invariables pour une instance d'une classe.
- Diversification des hiérarchies afin d'optimiser la puissance dérivant des mécanismes d'héritage multiple (Arpírez *et al.* 1998). Il est d'autant plus facile d'intégrer de nouveaux concepts (dans la mesure où ils peuvent être définis sur la base des concepts et des critères de classification préexistants) et d'hériter de propriétés de différents points de vue que le volume de connaissances inclus dans l'ontologie est suffisant et que l'éventail de critères de classification est large.
- Modularité (Bernaras *et al.* 1996): afin de minimiser le couplage entre modules.
- Minimisation de la distance sémantique entre des concepts frères (Aspírez *et al.* 1998): les concepts proches sont regroupés et représentés dans des sous-classes d'une même classe et devraient être définis en ayant recours aux mêmes primitives, alors que les concepts plus éloignés sont éclatés dans la hiérarchie.

- Normalisation systématique des noms dans la mesure du possible (Arpírez *et al.* 1998).

2.3 Composants des ontologies

Comme mentionné plus haut, les ontologies fournissent le vocabulaire commun d'un domaine et définissent, de façon plus ou moins formelle, le sens des termes et les relations entre ces derniers. Les connaissances intégrées dans les ontologies sont formalisées en mettant en jeu cinq types de composants: les classes, les relations, les fonctions, les axiomes et les instances (Gruber 1993). Les classes dans l'ontologie sont habituellement organisées en taxonomies. Il arrive que les définitions des ontologies aient été diluées, en ce sens que les taxonomies sont considérées comme des ontologies complètes (Studer *et al.* 1998).

- Les concepts sont utilisés dans leur sens large. Ils peuvent être abstraits ou concrets, élémentaires (électron) ou composés (atome), réels ou fictifs. En résumé, un concept peut être tout ce qui peut être évoqué et, partant, peut consister en la description d'une tâche, d'une fonction, d'une action, d'une stratégie ou d'un processus de raisonnement, etc.
- Les relations représentent un type d'interaction entre les notions d'un domaine. Elles sont formellement définies comme tout sous-ensemble d'un produit de n ensembles, c'est-à-dire $R: C_1 \times C_2 \times \dots \times C_n$. Des exemples de relations binaires sont *sous-classe-de* ou encore *connecté-à*.
- Les fonctions sont des cas particuliers de relations dans lesquelles le nième élément de la relation est défini de manière unique à partir des $n-1$ premiers. Formellement, les fonctions sont définies ainsi: $F: C_1 \times C_2 \times \dots \times C_{n-1} \rightarrow C_n$. Comme exemple de fonctions binaires, nous avons la

fonction *mère de* et le carré, et comme exemple de fonction ternaire, le prix d'une voiture usagée sur lequel on peut se baser pour calculer le prix d'une voiture d'occasion en fonction de son modèle, de sa date de construction et de son kilométrage.

- On a recours aux axiomes pour structurer des phrases qui sont toujours vraies.
- Des instances sont utilisées pour représenter des éléments.

Maintenant que les principaux éléments des ontologies ont été présentés, la question qui se pose est de savoir à quoi ressemble une ontologie explicite. Uschold et Grüninger (Uschold *et al.* 1996) ont distingué quatre sortes d'ontologies en fonction du type de langage utilisé: les ontologies hautement informelles (écrites en langage naturel), les ontologies semi-formelles (exprimées dans un langage naturel structuré et limité, c'est-à-dire que des patrons ont été mis en œuvre), les ontologies semi-formelles (définies dans un langage défini artificiellement et formellement) et les ontologies rigoureusement formelles (définies dans un langage contenant une sémantique formelle, des théorèmes et des preuves de propriétés telles que la robustesse et l'exhaustivité).

2.4 Types d'ontologies mises au point

Cette section n'a pas l'ambition de fournir une typologie exhaustive des ontologies telle que celles de van Heijst (*et al.* 1997) et Mizoguchi (*et al.* 1995). Elle présente néanmoins les types d'ontologies les plus couramment utilisés afin de permettre au lecteur d'avoir une idée des connaissances à inclure dans chaque type d'ontologie. En gros, on identifie les catégories suivantes: les ontologies de représentation des connaissances, les méta-ontologies, les ontologies de domaine, les ontologies de tâches, les

ontologies de domaine-tâche, les ontologies d'application, les ontologies d'index, les ontologies interactives, etc.

- Les ontologies de représentation de connaissances (van Heijst *et al.* 1997) regroupent les primitives de représentation utilisées afin de formaliser les connaissances selon des paradigmes de représentation des connaissances. L'exemple le plus représentatif de ce type d'ontologie est la *Frame-Ontology* (Gruber 1993), qui rassemble les primitives de représentation (classes, instances, cases, facettes, etc.) utilisées dans les langages à base de *frames*.
- Les ontologies générales/communes (Mizoguchi *et al.* 1995) incluent le vocabulaire lié aux objets, aux événements, au temps, à l'espace, à la causalité, au comportement, à la fonction, etc.
- Les méta-ontologies, également appelées ontologies génériques ou noyaux d'ontologies, (van Heijst *et al.* 1997) sont réutilisables dans différents domaines. L'exemple le plus représentatif serait une ontologie méréologique (Borst 1997), qui inclurait le terme *partie de*.
- Les ontologies de domaine (Mizoguchi *et al.* 1995) (van Heijst *et al.* 1997) sont réutilisables dans un domaine donné. Elles fournissent le vocabulaire des concepts d'un domaine (par ex., scalpel, scanner dans un domaine médical) et les relations entre ces derniers, les activités de ce domaine (par ex., anesthésier, accoucher) ainsi que les théories et les principes de base de ce domaine.
- Les ontologies de tâche (Mizoguchi *et al.* 1995) fournissent un vocabulaire systématisé des termes utilisés pour résoudre les problèmes associés à des tâches qui peuvent appartenir ou non à un même domaine. Ces ontologies fournissent un ensemble de termes au moyen desquels on peut décrire au niveau générique comment résoudre un type

de problème. Elles incluent des noms génériques (par ex., plan, objectif, contrainte), des verbes génériques (par ex., assigner, classer, sélectionner), des adjectifs génériques (par ex., assigné) et d'autres mots qui relèvent de l'établissement d'échéances.

- Les ontologies de domaine-tâche sont des ontologies de tâches réutilisables dans un domaine donné, mais pas dans différents domaines. Par exemple, une ontologie domaine-tâche dans le domaine médical pourrait inclure les termes liés au timing d'une intervention chirurgicale: planifier – intervention chirurgicale.
- Les ontologies d'application (van Heijst *et al.* 1997) contiennent suffisamment de connaissances pour structurer un domaine particulier.

Les méta-ontologies, les ontologies de domaine et les ontologies d'application saisissent les connaissances statiques indépendamment de la façon dont on résout les problèmes alors que les ontologies de PSM, les ontologies de tâches et les ontologies domaine-tâche sont axées sur les connaissances visant à résoudre des problèmes. Tous ces types d'ontologie peuvent être combinés de façon à construire une nouvelle ontologie. Si l'on applique le problème du compromis entre l'utilisabilité et la réutilisabilité (Klinker *et al.* 1991) au domaine de l'ontologie, on peut affirmer que plus une ontologie est réutilisable, moins elle est utilisable, et inversement.

3 Les ontologies les plus connues

Il est actuellement facile de recevoir des informations des organisations qui ont des ontologies sur le WWW. De nombreuses ontologies telles que les ontologies *Ontolingua* sur le serveur

Ontolingua⁽¹⁾ (Farquhar *et al.* 1996) et *Wordnet*⁽²⁾ (Miller 1990) à Princeton sont disponibles gratuitement sur la toile. D'autres ontologies, telles que les ontologies de *Cyc*⁽³⁾ (Lenat *et al.* 1990) sont partiellement disponibles gratuitement sur le web. La majorité d'entre elles, cependant, ont été mises au point par des compagnies pour leur propre utilisation et ne sont donc pas disponibles. La *Ontology Page*⁽⁴⁾ (également connue sous le nom de *Top*) et (*Onto 2Agent*)⁽⁵⁾ (Arpírez *et al.* 1998) (un moteur de recherche sur la toile s'appuyant sur une ontologie et qui aide à sélectionner des ontologies) peuvent aider à choisir des ontologies. Cette section introduit les ontologies les plus connues en prenant en compte la typologie d'ontologies énoncée ci-dessus.

L'exemple le plus représentatif des ontologies de représentation des connaissances est la *Frame Ontology* (Gruber 1993). Elle saisit les primitives de représentation utilisées dans les langages de *frame*, telles que les classes, les attributs des sous-classes, les partitions de classes, les relations et les axiomes. Elle permet de codifier d'autres ontologies en ayant recours aux conventions habituelles des frames. Elle est implémentée en *Kif 3.0* (Genesereth *et al.* 1992) et constitue le matériau de construction de base des traducteurs d'*Ontology Server*.

(1) <http://www-ksl.stanford.edu:5915> et <http://www-ksl-svc-lia.dia.fi.upm.es:5915>

(21) <http://www.tio.darpa.mil/Summaries95/B370-Princeton.html>

(3) <http://www.cyc.com/>

(4) <http://www.medg.lcs.mit.edu/doyle/top>

(5) <http://delicias.dia.fi.upm.es/OntoAgent/>

Les ontologies de haut niveau fournissent des concepts généraux à partir desquels tous les termes des ontologies existantes peuvent être définis. Citons le treillis booléen de Sowa (Sowa 1997), le *Penman Upper Level* (Bateman *et al.* 1990), *Cyc* (Lenat *et al.* 1990), la proposition de très haut niveau de Guarino (Guarino 1997), etc. En outre, des travaux sur une sorte d'ontologie «normalisée» de haut niveau ont été entamés au sein de l'Ansi en 1996.

L'*Ontologie méréologique* (Borst 1997) pourrait être l'exemple typique d'une méta-ontologie. Cette ontologie définit la relation *partie-de* et ses propriétés. Cette relation permet d'exprimer que des instruments sont formés de composants, qui peuvent eux-mêmes être constitués d'éléments plus petits.

L'*Ontologie Cyc* (Lenat *et al.* 1990) est une ontologie de sens commun qui fournit une grande quantité de savoir humain élémentaire. Elle consiste en un ensemble de termes et d'affirmations liées à ces termes. Elle se décompose, par ailleurs, en différentes microthéories. Chaque microthéorie rend compte seulement d'un point de vue important d'un domaine de connaissances. Certains domaines peuvent traiter plusieurs microthéories, qui représentent différentes perspectives et affirmations, divers niveaux de granularité et de distinction. Les *Ontologies Cyc* sont implémentées dans le langage *CycL*.

Le *Generalized Upper model* (Bateman *et al.* 1995), *Wordnet* (Miller 1990), et *Sensus* (Swartout *et al.* 1997) représentent le mieux les ontologies linguistiques. Le *Generalized Upper model (Gum)*⁽⁶⁾ est une ontologie linguistique générale, indépendante de tout domaine et de tout type de tâche. Afin de pouvoir la

transférer dans différentes langues, il a été prévu que l'ontologie *Gum* inclue seulement les notions linguistiques principales et leur organisation dans toutes les langues; elle omet ainsi les détails qui différencient les langues. Cette philosophie a permis d'utiliser *Gum* pour créer des ontologies pour des langues spécifiques, telles que l'anglais, l'allemand, l'espagnol et l'italien en rajoutant les traits sémantiques propres à chaque langue. L'ontologie a été implémentée en *Loom*. *WordNet* est une base de données lexicale pour l'anglais fondée sur des principes psycholinguistiques. Ses informations sont ventilées en unités appelées «synsets» en anglais, qui sont des jeux de synonymes interchangeables dans un contexte particulier utilisés pour représenter différents sens. *WordNet* contient une série de paires (*w*, *m*) où *w* est une série de caractères Ascii et *m* un élément d'un ensemble de sens, ou *synset*. Les *synsets* sont accompagnés dans leur plus grand nombre de glossaires explicatifs, et ils sont organisés dans un réseau sur la base de relations sémantiques, au nombre desquelles: l'antonymie, l'hyponymie, la métonymie, l'implication. *WordNet* se compose de quatre réseaux qui représentent les catégories syntaxiques principales: noms, verbes, adjectifs et adverbes. *Sensus* est une ontologie basée sur le langage naturel qui a pour fonction de fournir une vaste structure conceptuelle aux travaux menés en matière de traduction automatique. Il a été mis au point en rassemblant et en extrayant des données de ressources électroniques telles que: *Penman Upper model*, *Ontos*, *WordNet* et des dictionnaires électroniques de langages naturels. Il compte plus de 50 000 notions.

Dans le domaine des ontologies d'ingénierie, les ontologies *EngMath* (Gruber *et al.* 1994) et *PhysSys* (Borst 1997) méritent une attention particulière. *EngMath* est une ontologie *Ontolingua* mise au point

pour la modélisation mathématique en ingénierie. Elle inclut des bases conceptuelles pour des grandeurs scalaires, vectorielles et tensorielles, des dimensions physiques, des unités de mesure, des fonctions sur les quantités et des quantités de dimensions. *PhysSys* est une ontologie d'ingénierie destinée à modéliser, simuler et concevoir des systèmes physiques. Elle comporte trois ontologies d'ingénierie qui formalisent les trois points de vue sur les outils physiques: présentation du système, comportement de processus physique et relations mathématiques descriptives. Trois ontologies d'ingénierie formalisent chacun de ces trois points: une ontologie de composants, une ontologie de processus et l'ontologie *EngMath*. Les interdépendances entre ces ontologies sont formalisées comme des projections d'ontologies. Ces ontologies mettent en œuvre d'autres méta-ontologies: méréologie, topologie et théories des systèmes.

Les ontologies qui représentent le mieux les ontologies dédiées à la modélisation d'entreprises sont l'*Enterprise Ontology* (Uschold *et al.* 1996) et la *Tove Ontology* (Gruninger *et al.* 1995). L'*Enterprise Ontology*⁽⁷⁾ est un ensemble de termes et de définitions pertinent pour les entreprises commerciales et inclut des connaissances sur les activités et les processus, les organisations, les stratégies, le marketing, etc. Les ontologies élaborées dans le cadre du projet *Tove* (Toronto Virtual Enterprise)⁽⁸⁾ sont l'ontologie de conception d'entreprises, l'ontologie des projets, l'ontologie-agenda, ou encore l'ontologie des services.

L'ontologie (KA)²⁽⁹⁾ (Benjamins *et al.* 1999) constitue un

(7) <http://www.aii.ed.ac.uk/project/enterprise>

(8) <http://www.ie.utoronto.ca/EIL>

(9) <http://www.aifb.uni-karlsruhe.de/WBS/broker/KA2.html>

(6) <http://www.darmstadt.gmd.de/publish/komet/gen-um/newUM.html>

bon exemple d'ontologie dédiée à la gestion de connaissances, qui sera utilisée par le *Knowledge Annotation Initiative* de la communauté d'acquisition des connaissances. Cette ontologie servira de base pour annoter les documents sur internet de la communauté d'acquisition des connaissances de façon à fournir un accès intelligent à ces documents. Des spécialistes situés dans des zones géographiques différentes travaillent ensemble à la mise au point de cette ontologie.

4 Méthodologies

L'élaboration d'ontologies relève plus du savoir-faire que de l'ingénierie. Lors du processus de mise au point d'une ontologie, chaque équipe de développement suit habituellement ses propres principes, ses critères de conception et ses étapes d'élaboration. L'absence de directives et de méthodes consensuelles entrave, d'une part, le développement d'ontologies communes et acceptées par les équipes et entre elles, et d'autre part, l'extension d'une ontologie donnée à partir d'autres, sa réutilisation dans d'autres ontologies et dans des applications finales.

Les constructeurs d'ontologies ont l'habitude de passer directement de l'acquisition de données à l'implémentation, ce qui n'est pas sans causer quelques problèmes: les modèles conceptuels des ontologies sont implicites dans les codes d'implémentation; les interventions ontologiques et les critères d'élaboration sont à la fois implicites et explicites dans le code de l'ontologie; il est impossible pour les experts et les utilisateurs finaux de décrypter les ontologies formelles codées dans des langages ontologiques; comme c'est le cas pour les bases de connaissances traditionnelles. Le codage direct du

résultat de l'acquisition de connaissances est trop abrupt, spécialement en ce qui concerne les ontologies complexes; les préférences des concepteurs d'ontologies pour un certain langage conditionnent l'implémentation des connaissances acquises; et les personnes qui mettent au point des ontologies (qui ne connaissent pas les langages dans lesquels les ontologies sont codées ou qui ne les maîtrisent pas bien) peuvent trouver difficile de comprendre les ontologies implémentées ou même d'en construire une nouvelle dans la mesure où les outils ontologiques traditionnels sont trop focalisés sur les problèmes d'implémentation et pas assez sur la conception.

4.1 Méthodes à suivre pour élaborer sa propre ontologie

Le processus d'élaboration d'ontologies se réfère aux tâches à accomplir pour construire des ontologies (Fernandez *et al.* 1997). Les activités se répartissent en trois groupes: la gestion du projet, le développement et les activités intégrales. La gestion du projet concerne le bon déroulement du processus, qui inclut des tâches de l'ordre de la planification, de la supervision et de l'assurance qualité. Le développement consiste à construire l'ontologie en travaillant à sa spécification, à sa conceptualisation, à sa formalisation, à son implémentation et à sa maintenance. Quant aux activités intégrales, elles servent à soutenir le développement et incluent la gestion de l'acquisition de connaissances, l'intégration, l'évaluation, la documentation et la gestion de configuration. Si les ontologies sont de taille réduite, il est possible de supprimer quelques tâches. Par contre, s'il s'agit de construire des ontologies à grande échelle correctes

et exhaustives, il convient d'éviter des constructions anarchiques.

La méthodologie d'Uschold et Kings (Uschold *et al.* 1995) se fonde sur l'expérience de la construction de l'*Enterprise Ontology*, qui inclut un ensemble d'ontologies pour la modélisation d'entreprises. Ils proposent les étapes suivantes: (1) identification du but et de l'étendue de l'ontologie, (2) construction de l'ontologie en consignnant et en codant des connaissances, ainsi qu'en les intégrant à des ontologies existantes, (3) évaluation, (4) documentation, et (5) établissement de directives pour chaque étape.

Quant à la méthodologie de Grüninger et Fox (Grüninger *et al.* 1995), elle se base sur l'expérience de la construction d'une ontologie de modélisation d'entreprise dans le cadre du projet *Töve*. Il s'agit essentiellement de la construction d'un modèle logique des connaissances à inclure dans l'ontologie. Ce modèle n'est pas construit directement. Les spécifications que doit comprendre l'ontologie sont décrites de façon informelle en identifiant un ensemble de questions de compétence, et cette description est ensuite formalisée dans un langage basé sur la logique des prédicats. Les questions de compétence constituent l'élément-clé qui permet de caractériser de façon rigoureuse les connaissances que doit inclure une ontologie et elles spécifient le problème ainsi que ce qui constituerait une bonne solution au problème. Par un mécanisme de composition et de décomposition, on peut utiliser les questions de compétence et leurs réponses pour répondre à des questions de compétence plus complexes qui figurent dans d'autres ontologies, et permettre ainsi d'intégrer d'autres ontologies.

Le cadre *Methontology* (Gómez-Perez 1998 et Fernandez *et al.* 1999) permet de construire des ontologies

au niveau des connaissances. Il inclut l'identification du processus de développement ontologique, une proposition de cycle de vie et la méthodologie elle-même. Le processus de développement ontologique identifie les tâches à accomplir lorsque l'on construit une ontologie (planification, supervision, assurance qualité, spécification, acquisition de connaissances, conceptualisation, intégration, formalisation, implémentation, évaluation, maintenance, documentation et gestion de configuration). Le cycle de vie basé sur l'évolution des prototypes identifie les phases de l'évolution de l'ontologie. Finalement, la méthodologie elle-même spécifie les étapes à suivre pour réaliser chaque activité, les techniques utilisées, les produits à être mis au point ainsi que la façon de les évaluer. La phase de conceptualisation constitue la principale phase du processus d'élaboration de l'ontologie selon l'approche de la *Methontology*. Au cours des phases de spécification et de conceptualisation, on a achevé un processus d'intégration en utilisant des ontologies réalisées en interne ou à l'extérieur. Ce cadre est soutenu en partie par l'*Ontology Design Environment* (ODE) (Blásquez *et al.* 1998) (Fernandez *et al.* 1999), un environnement logiciel. Plusieurs ontologies ont été mises au point en ayant recours à cette méthodologie : *Chemicals*, une ontologie spécialisée dans les produits chimiques ; les ontologies des polluants environnementaux (Gómez-Pérez *et al.* 1999) qui représentent les méthodes de détection des composantes de différents polluants de plusieurs environnements : eau, air, sol, etc., ainsi que les concentrations maximales autorisées de ces composantes, en tenant compte de la législation en cours (réglementations de l'Union européenne, de l'Espagne, de l'Allemagne, des États-Unis,

etc.) ; la *Reference-Ontology* (Arpírez *et al.* 1998), une ontologie qui constitue une sorte de pages jaunes des ontologies ; ainsi que la version restructurée de l'ontologie (*KA*)² (Blásquez *et al.* 1998). La *Foundation for Intelligent Physical Agents* (*Fipa*)⁽¹⁰⁾, qui promeut l'interopérabilité entre les applications programmées à l'aide d'agents, a proposé de recourir à cette méthodologie pour construire des ontologies.

L'identification du but recherché et le besoin d'acquisition de connaissances relatives à un domaine constituent le point de départ commun à toutes ces méthodologies. Néanmoins, après l'assimilation d'une quantité impressionnante de connaissances, la méthodologie d'Uschold propose de coder dans un langage formel et *Methontology* suggère d'exprimer l'idée sous la forme d'un ensemble de *représentations intermédiaires (RI)*. Ensuite, l'ontologie est produite par des traducteurs. Ces *RI* comblent l'espace entre la façon dont les gens perçoivent un domaine et les langages de formalisation des ontologies. Ces représentations intermédiaires offrent une approche conviviale tant pour l'acquisition de connaissances que pour l'évaluation effectuée par des informaticiens et des spécialistes qui ne sont pas des cognitivistes (Aguado *et al.* 1998).

Les trois méthodologies susmentionnées révèlent également la nécessité d'évaluer les ontologies (Gómez-Pérez 1996). Si la méthodologie d'Uschold prévoit cette opération, elle ne précise pas la façon dont elle devrait être menée. Grüninger et Fox proposent d'identifier un ensemble de questions de compétence. Dès que l'ontologie a été exprimée de façon formelle, elle est comparée à cet ensemble de questions de compétence. Finalement,

(10) <http://www.fipa.org>

Methontology propose que l'évaluation soit effectuée tout au long du processus d'élaboration d'ontologies. La plus grande partie de l'évaluation est menée durant la phase de conceptualisation.

5 Langages et environnements pour la construction d'ontologies

5.1 Langages les plus couramment utilisés pour construire des ontologies.

En gros, plusieurs systèmes de représentation ont été présentés ici pour formaliser des ontologies à l'aide d'une approche basée sur les *frames*, sur la logique des prédicats ou les deux. Les langages les plus représentatifs sont *Ontolingua* (Gruber 1993), *Cycl* (Lenat *et al.* 1990), *Loom* (MacGregor 1991) et *Flogix* (Kifer *et al.* 1995).

Ontolingua est un langage basé sur *Kif* et sur la *Frame Ontology* ; il est en outre le langage de construction d'ontologies utilisé par l'*Ontology Server*. *Kif* (*Knowledge Interchange Format*) est une *interlingua* qui intègre une sémantique déclarative, qui a une force expressive suffisante en général pour représenter la connaissance déclarative contenue dans la base de connaissances du système des applications, et une structure qui a rendu possible de procéder à des traductions semi-automatiques à partir de/ vers des langages de représentation classiques. Il s'agit d'une version préfixée de la logique des prédicats, qui comporte des extensions servant à optimiser sa force expressive, au nombre desquelles figurent la définition des termes, la représentation de la connaissance sur la connaissance, la réification des fonctions et des relations, la spécification d'ensembles et le

raisonnement non monotone. La *Frame Ontology*, qui, comme mentionné plus haut, est une ontologie de représentation de connaissances destinée à modéliser des connaissances dans une approche s'appuyant sur des *frames*, a été construite sur la base de *Kif* et d'une série d'extensions à ce langage.

Le langage *Ontolingua* permet de construire des ontologies des trois façons suivantes: (1) emploi d'expressions *Kif*, (2) utilisation exclusive du vocabulaire de la *Frame Ontology* (impossibilité de représenter des axiomes), (3) recours aux deux langages simultanément, en fonction des préférences du constructeur d'ontologies. Quoi qu'il en soit, la définition d'*Ontolingua* se compose d'un titre, d'une définition informelle en langage naturel et d'une définition formelle écrite en *Kif* ou en utilisant le vocabulaire de l'ontologie des *Frames*. Une application GFP (Chaudhri *et al.* 1997) est nécessaire pour raisonner avec les ontologies *Ontolingua*.

CycL, qui n'est autre que le langage de représentation de connaissances de *Cyc*, est un langage déclaratif et expressif proche de la logique des prédicats et qui comprend des extensions qui permettent de traiter l'égalité, le raisonnement par défaut, l'application de la fonction de Skolem et quelques aspects de la logique du second ordre. *CycL* utilise une certaine forme de circonscription, inclut l'hypothèse du nom unique, et peut utiliser l'hypothèse du monde clos où cela s'avère nécessaire. Le moteur d'inférence de *Cyc* réalise des déductions logiques générales, fait appel à la stratégie du meilleur d'abord en ayant recours à un ensemble d'heuristiques exclusives, utilise des microthéories afin d'optimiser les inférences dans des domaines restreints, et inclut plusieurs modules de déduction spécialisés afin de traiter des types d'inférences spécifiques.

Loom est un langage de programmation perfectionné basé sur la logique et l'environnement de premier ordre, qui appartient à la famille *KL-One*. Le langage *Loom* fournit un langage expressif et explicite de spécification de modèles déclaratifs ainsi qu'un support déductif puissant, qui inclut à la fois un raisonnement strict et un raisonnement par défaut, et une vérification automatique de la cohérence. Il offre en outre plusieurs paradigmes de programmation, qui constituent une sorte d'interface avec la spécification de modèle déclaratif, et des services à base de connaissances.

Flogis est une intégration de langages de frames et de logique des prédicats. Il inclut des objets (simples et complexes), le principe d'héritage, les types polymorphes, les méthodes de recherche et l'encapsulation. La logique des prédicats, d'une part, et l'héritage structurel et comportemental, d'autre part, forment la base de son système déductif.

5.2 Comment les outils logiciels soutiennent-ils le processus de conception et d'utilisation des ontologies?

L'*Ontolingua Server* (Farquhar *et al.* 1996), *Ontosaurus*⁽¹⁾ (Swartout *et al.* 1997), *Ode* (Blázquez *et al.* 1998 et Fernandez *et al.* 1999) ainsi que *Tadzebao* et *WebOnto* (Domingue 1998) constituent les outils principaux destinés à concevoir des ontologies.

L'*Ontolingua Server* est l'environnement le plus connu pour construire des ontologies dans le langage *Ontolingua*. Il s'agit d'un ensemble d'outils et de services qui assistent la conception d'ontologies

communes à laquelle collaborent des groupes de travail opérant depuis des endroits différents. Il a été élaboré par le *Knowledge Systems Laboratory* dans le cadre du programme *Knowledge Sharing Effort* de l'*Arpa* à l'université de Stanford. L'architecture du serveur d'ontologie permet d'accéder à une bibliothèque d'ontologies, à des traducteurs de langages de programmation (*Prolog*, *Corba's IDL*, *Clips*, *Loom*, *Kif*) et à un éditeur qui permet de créer et de parcourir des ontologies. Trois types d'interaction sont possibles: il peut s'agir ainsi de collaborateurs qui souhaitent écrire et examiner des ontologies à distance, d'applications éloignées susceptibles de vouloir interroger et modifier des ontologies sur le serveur via l'Internet ou des applications locales. L'URL suivant permet d'accéder au serveur de l'ontologie: <http://www-ksl-svc.stanford.edu:5915/>.

L'*Ontosaurus*, créé à l'Information Sciences Institute de l'University of South California, s'articule en deux parties: un serveur d'ontologie qui utilise *Loom* comme système de représentation des connaissances et un serveur de navigation dans les ontologies qui crée dynamiquement des pages HTML (qui incluent de la documentation constituée tant d'images que de textes). Ce serveur présente la hiérarchie de l'ontologie et utilise les formulaires HTML pour permettre à l'utilisateur d'éditer l'ontologie. En outre, des traducteurs de *Loom* vers *Ontolingua*, *Kif*, *KRSS* et *C++* ont été élaborés.

Ode (Ontology Design Environment) est actuellement mis au point à la faculté d'informatique de l'Universidad Politecnica de Madrid. Au nombre des avantages que présente *Ode* figurent le module de conceptualisation destiné à construire des ontologies et le module servant à élaborer des modèles conceptuels *ad hoc*. Grâce au module de conceptualisation, l'ontologue peut

(1) <http://www.indra.isi.edu:8000>

développer l'ontologie au niveau de la connaissance en mettant en œuvre un jeu de représentations indépendantes du langage cible dans lequel l'ontologie sera implémentée. Une fois la conceptualisation terminée, des codes *Ode* sont créés automatiquement par des générateurs de code. Les générateurs les plus courants sont *Ontolingua*, *Flogic* et une base de données relationnelles. De cette façon, les personnes non-initiées aux langages d'implémentation des ontologies sont en mesure de spécifier et de valider des ontologies grâce à cet environnement. Le module pour construire des modèles conceptuels *ad hoc* inclut un langage appelé *Language for building intermediate representations (LBIR)*, qui donne la possibilité aux ontologues de spécifier le type de modèle adapté à leur ontologie.

Le *Knowledge Media Institute of the Open University* a créé deux outils complémentaires, à savoir *Tadzebao* et *WebOnto*. *Tadzebao* permet aux cogniticiens de discuter en synchronisé ou en asynchronisé des ontologies; quant à *WebOnto*, il offre un support à la consultation, à la création et à l'édition conjointes d'ontologies.

6 Applications qui utilisent des ontologies

Si les ontologies peuvent être utilisées (Uschold *et al.* 1996) afin de communiquer entre des systèmes, des personnes et des organisations, d'interopérer entre des systèmes, de soutenir la conception et le développement de systèmes logiciels intelligents ou non, le nombre d'applications pour lesquelles on a recourt à des ontologies en vue d'en modéliser les connaissances est réduit. Cela signifie que bon nombre de ces ontologies ont été construites pour

une application spécifique, sans intention de les réutiliser ou de les partager. Le fait que la réutilisation d'ontologies dans des applications soit une pratique encore peu répandue tient à différentes raisons⁽¹²⁾ (Arpíez *et al.* 1998) : les ontologies sont hébergées sur différents serveurs, la formalisation varie en fonction du serveur où se trouve l'ontologie, les ontologies placées sur un même serveur sont généralement décrites avec des degrés de précision variables et il n'existe aucun format commun pour présenter les informations sur les ontologies de façon à ce que les utilisateurs puissent choisir l'ontologie qui leur convient le mieux. Ces problèmes expliquent sans doute le nombre réduit d'applications dans les domaines de la gestion des connaissances, des moteurs de recherche s'appuyant sur des ontologies, de la génération de langues naturelles, de la modélisation d'entreprise, des systèmes intelligents et de l'interopérabilité entre les systèmes. Les applications qui utilisent des ontologies sont reprises dans leur plus grand nombre dans les actes de l'atelier sur les *Applications of ontologies and PSMs* organisé dans le cadre de l'ECAI98 (voir <http://delicias.dia.fi.upm.es/WORKS/HOP/ECAI98/index.html>).

Plusieurs applications utilisent des ontologies écrites en langage naturel. *Gum* est utilisé pour des applications spécialisées dans le traitement du langage naturel dans différentes langues : *Penman* (Bateman *et al.* 1990), un générateur de textes dans différents domaines; *Komet*, qui génère des textes en anglais, allemand et néerlandais; *TechDocb* (Rosner 1994), qui génère de textes techniques multilingues; *Al Fresco* (Stock *et al.* 1993), un système de recherche documentaire spécialisé

dans l'histoire de l'art italien; *Gist*, un système multilingue qui génère des textes administratifs en anglais, allemand et italien; *OntoGeneration* (Aguado *et al.* 1998), qui réutilise des ontologies spécialisées (produits chimiques); *Gum* et la technologie de génération de langage naturel (KPLM (Bateman *et al.* 1994)) pour la génération de textes espagnols dans le domaine des substances chimiques; et l'atelier d'utilisation de plusieurs ontologies dans une architecture *pipeline* de génération de langage naturel présenté dans Frohlich (*et al.* 1998). Hoenkamp (Hoenkamp 1998) utilise *WordNet* pour localiser les lacunes dans une ontologie qui représente les besoins en information des utilisateurs en analysant des documents consultés.

Dans le domaine de la modélisation d'entreprises, l'*Enterprise Toolset* constitue l'environnement le plus perfectionné qui inclut l'*Enterprise Ontology*. Il utilise une architecture constituée d'agents de façon à intégrer des outils prédéfinis selon un mode «plug-and-play». Les éléments constitutifs de l'*Enterprise Toolset* sont : un *Procedure Builder* servant à saisir les modèles de processus, un *Agent Toolkit* qui soutient le développement des agents, un *Task Manager* servant à intégrer, visualiser et assurer le déroulement du processus, ainsi qu'une *Enterprise Ontology* pour la communication (voir <http://www.aiia.ed.ac.uk/project/enterprise> pour plus d'informations). D'autres applications utilisent des ontologies *Tove*. L'*Enterprise Design Workbench* constitue un environnement d'étude qui permet à l'utilisateur d'explorer une série de structures d'entreprises. Il offre une étude comparée des différentes structures d'entreprises et oriente le concepteur. Dans le cadre de l'*Integrated Supply Chain Management Project*, un réseau d'agents intelligents coopératifs réalise une ou plusieurs fonctions de la

(12) <http://delicias.dia.fi.upm.es/OntoAgent>

chaîne d'approvisionnement, et chaque agent coordonne ses actions avec les autres agents. L'entreprise virtuelle *Tove* fournit le banc de test utilisé par les agents qui ont été conçus pour les fonctions de chaînes d'approvisionnement principales : logistique, transport, gestion, etc.

Les courtiers en WWW ont commencé récemment à utiliser les ontologies dans différents domaines. *Ontobroker*⁽¹³⁾ (Fensel *et al.* 1998) est un service pour la gestion de connaissances qui est utilisé dans le contexte de la *Knowledge Annotation Initiative* de la communauté d'acquisition des connaissances. (*Onto*)²*Agent* (Arpírez *et al.* 1998) est un moteur basé sur une ontologie pour rechercher des ontologies sur la toile : il utilise la *Reference-Ontology* comme source de connaissances et il extrait des descriptions d'ontologies qui satisfont un nombre donné de contraintes. Il est disponible à l'URL suivant : <http://delicias.dia.fi.upm.es/OntoAgent/>. *Chemical OntoAgent* (Arpírez *et al.* 1998), un moteur de recherche sur la toile s'appuyant sur une ontologie et spécialisé dans l'enseignement de la chimie, permet aux étudiants d'apprendre la chimie et d'évaluer leurs connaissances dans ce domaine. *Chemicals* constitue sa source de connaissances.

Kactus (Schreiber *et al.* 1995) est un projet *Esprit* qui traite de la modélisation des connaissances sur les systèmes techniques complexes à emplois multiples et du rôle des ontologies dans cette modélisation. Des ontologies spécialisées dans les domaines de la conception et de l'évaluation des réseaux électriques, de l'extraction de pétrole en mer, et des navires ont été créées.

Plinius (van de Vet *et al.* 1995) est un système d'acquisition de connaissances semi-automatique spécialisé dans les textes en langage

naturel traitant de la céramique, de ses propriétés et de sa production.

Conclusions

Dans cet article, nous avons examiné les développements récents survenus dans le domaine de l'ontologie. Dans la situation actuelle, l'on remarque une bonne compréhension globale de la nature et de la fonction des ontologies et il apparaît que les travaux réalisés se fondent désormais sur les acquis pour évoluer dans de nouvelles directions.

Dans le domaine de l'ontologie, on s'intéresse avant tout à l'intégration d'ontologies hétérogènes, à la caractérisation et à la consultation des ontologies sur la toile, à l'intégration d'ontologies et de méthodes de résolution de problèmes, ainsi qu'à l'utilisation d'ontologies dans le but d'analyser et de générer du langage naturel. Par ailleurs, des efforts sont fournis pour se rapprocher du monde orienté objet et des bases de données. Il est clair que les ontologies acquièrent une importance notoire dans un grand nombre de domaines.

Asunción Gómez-Pérez,
Faculté d'informatique,
Universidad Politécnica de Madrid,
Madrid,
Espagne.

Traduit de l'anglais par S. Descotte,
Centre de recherche Termisti,
Bruxelles.

Bibliographie

- Agüado (G.), Bateman (J.), Bañón (A.), Bernardos (S.), Fernández (M.), Gómez-Pérez (A.), Nieto (E.), Olalla (A.), Plaza (R.), Sanchez (A.), 1998: «*ONTOGENERATION: Reusing domain and linguistic ontologies for Spanish*», dans *Workshop on Applications of Ontologies and PSMs*, Brighton, p. 1-10.
- Arpírez (J.), Gómez-Pérez (A.), Lozano (A.), Pinto (S.), 1998: «*(ONTO)2Agent: An ontology-based WWW broker to select ontologies*», dans *Workshop on Applications of Ontologies and PSMs*, Brighton, p. 16-24.
- Bateman (J.A.), Magnini (B.), Fabris (G.), 1995: «*The Generalized Upper Model Knowledge Base: Organization and Use*», dans *Towards Very Large Knowledge Bases*, IOS Press, p. 60-72.
- Bateman (J. A.), 1994: *KPML: The KOMET-Penman (Multilingual) Development Environment*. Technical Report, GMD/IPSI, Darmstadt.
- Bateman (J. A.), Kasper (R. T.), Moore (J. D.) and Whitney (R. A.), 1990: *A General Organization of Knowledge for Natural Language Processing: the Penman Upper Model*. Technical Report, USC/ISI, Marina del Rey, California.
- Benjamins (R.), Fensel (D.), Decker, Gómez-Pérez (A.), 1999: «*(KA)2 Building Ontologies for the Internet: A mid term report*». À paraître dans l'International Journal of Human Computer Studies.
- Bernaras (A.), Laresgoiti (I.) and Corera (J.), 1996: *Building and Reusing Ontologies for Electrical network Applications. Proceedings of the 12th ECAI*, p. 298-302.
- Blázquez (M.), Fernández (M.), García-Pinar (J. M.), Gómez-Pérez (A.), 1998: *Building Ontologies at the Knowledge Level using the Ontology Design Environment. Proceedings of the Eleventh Knowledge Acquisition Workshop, KAW98*, Banff.
- Borgo, (S.); Guarino, (N.); Masolo, (C.), 1996: «*Stratified Ontologies: the case of physical objects*», dans *Proceedings of the Workshop on Ontological*

(13) <http://www.aifb.uni-karlsruhe.de/WBS/broker>

- Engineering. Held in conjunction with ECAI96*, Budapest, p. 5-15.
- Borst (W. N.), 1997: *Construction of Engineering Ontologies* University of Twente, Enschede, Centre for Telematica and Information Technology.
- Bylander (T.), Chandrasekaran (B.), 1998: «Generic Tasks in Knowledge-based reasoning: The right level of abstraction for Knowledge Acquisition», dans B. Gaines and J. Boose Editors, *Knowledge Acquisition of Knowledge Based Systems*. Volume 1, Academic Press London, p. 65-77.
- Chaudhri Vinay (K.), Farquhar (A.), Fikes (R.), Karp (P. D.), Rice (J. P.), 1997: *The Generic Frame Protocol 2.0*, Technical Report, Stanford.
- Domingue (J.), 1998: «Tadzebao and Webonto: Discussing, Browsing and editing ontologies on the web», dans *Proceedings of the Eleventh Knowledge Acquisition Workshop*, KAW98, Banff.
- Farquhar (A.), Fikes (R.), Rice (J.), 1996: «The Ontolingua Server: A Tool for Collaborative Ontology Construction», *Proceedings of the 10th Knowledge Acquisition for Knowledge-Based Systems Workshop*, Banff, Alberta, Canada, p. 44.1-44.19, 1996.
- Fensel (D.), Decker (S.), Erdman (M.) Studer (R.), 1998: «Ontobroker: The Very High Idea», dans *Proceedings of the 11th International Flairs Conference (FLAIRS-98)*, Sanibal Island.
- Fernández (M.); Gómez-Pérez (A.), Pazos (J.); Pazos (A.), 1999: *Building a Chemical Ontology using methontology and the ontology desing environment*. *IEEE Intelligent Systems and their applications*. 14 (1):37-45, 1999.
- Fernández (M.), Gómez-Pérez (A.) Juristo (N.), 1997: *METHONTOLOGY: From Ontological Art Toward Ontological Engineering*. Spring Symposium Series on Ontological Engineering, AAAI97, Stanford, USA.
- Frohlich (M.); van de Riet (P.), 1998: *Using Multiple ontologies in a framework for Natural language generation. Workshop on Applications of Ontologies and PSMs*. Brighton, England, p. 67-77.
- Genesereth (M.), Fikes (R.), 1992: *Knowledge Interchange Format. Technical Report*, Computer Science Department, Stanford University, Logic-92-1.
- Gómez-Pérez (A.); Rojas-Amaya (M.D.), Ontological Reengineering for Reuse. Knowledge Acquisition Modeling and Management. 11th European Workshop, EKAW'99. Dagstuhl Castle, Germany, May 26-29, 1999, p. 139-156.
- Gómez-Pérez (A.), 1998: *Knowledge Sharing and Reuse The Handbook of Applied Expert Systems*. Edited by J. Liebowitz, CRC Press
- Gómez-Pérez (A.), 1996: *A Framework to Verify Knowledge Sharing Technology. Expert Systems with Application*. Vol. 11, N. 4., p. 519-529.
- Gruber (T.) and Olsen (R.), 1994: *An Ontology for Engineering Mathematics. Technical Report KSL-94-18*, Knowledge Systems Laboratory, Stanford University, CA.
- Gruber (T.), 1993: *A translation Approach to portable ontology specification. Knowledge Acquisition*, 5: 199-220
- Gruber (T.), 1995: *Toward Principles for the Design of Ontologies Used for Knowledge Sharing. International Journal of Human Computer Studies*, 43:907-928
- Gruninger (M.), Fox (M.), 1995: *Methodology for the Design and Evaluation of Ontologies. Proceedings of IJCAI95's Workshop on Basic Ontological Issues in Knowledge Sharing*.
- Guarino (N.), 1997: «Some Organizing Principles for a unified top-level ontology», dans *Spring Symposium Series on Ontological Engineering*. Stanford, p. 57-63.
- Guarino (N.), Giarretta (P.), 1995: «Ontologies and Knowledge Bases: Towards a Terminological Clarification», dans Mars (N.J.I.), *Towards Very Large Knowledge Bases: Knowledge Building & Knowledge Sharing*. IOS Press, p. 25-32.
- van Heist (G.), Schreiber (A. Th.), Wielinga (B. J.), 1997: *Using explicit ontologies in KBS development, International Journal of Human-Computer Studies*, 45, p. 183-292.
- Hoenkamp (E.), 1998: «Spotting Ontological Lacunae through spectrum analysis of retrieved documents», dans *Workshop on Applications of Ontologies and PSMs*, Brighton, England, p. 73-77.
- Kifer (M.), Lausen (G.), Wu (J.), 1995: *Logical Foundations of Object-Oriented and Frame-Based Languages, Journal of the ACM*.
- Klinder (M.); Lausen (G.); Wu (J.), 1995: *Logical Foundations of Object oriented and frame-based languages. Journal of ACM*.
- Lenat (D.B.), Guha (R V.), 1990: *Building Large Knowledge-based systems. Representation and Inference in the Cyc project*. Addison-Wesley, Reading, Massachusetts.
- MacGregor (R.), 1991: *Inside the LOOM classifier*. SIGART bulletin, 2 (3):70-76.
- Miller (G. A.), 1990: *WordNet: An On-line Lexical Database, International Journal of Lexicography* 3, 4: 235- 312
- Mizoguchi (R.); Vanwelkenhuysen, (J.); Ikeda (M.), 1995: «Task Ontology for reuse of problem solving knowledge», dans Mars (N.J.I.), *Towards Very Large Knowledge Bases: Knowledge Building & Knowledge Sharing*. IOS Press, p. 46-57.
- Neches (R.), Fikes (R.E.), Finin (T.), Gruber (T.R.), Senator (T.), and Swartout (W.R.), 1991: *Enabling technology for knowledge sharing. AI Magazine*, 12(3):36-56.
- Rösner (D.), 1994: *Generating Multilingual Documents from a Knowledge Base: The TECHDOC Project. Technical Report FAW Ulm*, Ulm (Germany).
- Sowa (J. F.), 1997: *Knowledge Representation: Logical, Philosophical, and Computational Foundations*, Boston, MA, PWS Publishing Company. À paraître.
- Stock (O.), Carenini (G.), Cecconi (F.), Franconi (E.), Lavelli (A.), Magnini (B.), Pianesi (F.), Ponzi (M.), Samek-Lodovici (V.) and Strapparava (C.), 1993: «ALFRESCO: Enjoying the Combination of Natural Language Processing and Hypermedia for Information Exploration», dans Mark T. Maybury, editor, *Intelligent Multimedia Interfaces*, The MIT Press, p. 197-224,

chapter 9: *Extended and revised version of a paper previously published at IJCAI-91.*

Studer (R.), Benjamins (V.R.), Fensel (D.), 1998: *Knowledge Engineering: Principles and Methods. Data & Knowledge Engineering*. 25: 161-197.

Swartout (B.), Patil (R.), Knight (K.) and Russ (T.), 1997: *Towards Distributed Use of Large-Scale Ontologies. Spring Symposium Series on Ontological Engineering*, Stanford University, CA, p. 138-148.

Uschold (M.), Grüninger (M.), 1996: *ONTOLOGIES: Principles, Methods and 16 applications, Knowledge Engineering Review*, Vol. 11, N. 2

Van der Vet (P.E.), Speel (P.-H.), Mars (N. J. I.), 1994: *The Plinius ontology of ceramic materials. Proceedings of ECAI94's Workshop on Comparison of Implemented Ontologies*, Amsterdam.